Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

LA RECHERCHE AU CENTRE CANADIEN SUR LA FIBRE DE BOIS ET AU CENTRE DE FORESTERIE DES LAURENTIDES DE RESSOURCES NATURELLES CANADA

La génomique forestière

Canada

Mention de source

Page 6 (gauche), page 7 (gauche et en bas à droite) et page 8 (gauche) : Agence canadienne d'inspection des aliments

Toutes les autres photos sont de Ressources naturelles Canada.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministère des Ressources naturelles Canada, 2018

Numéro de catalogue version (papier) : Fo4-124/2018
ISBN version (papier) : 978-0-660-25511-8

Numéro de catalogue version (web) : Fo4-124/2018F-PDF
ISBN version(web) : 978-0-660-25510-1

- Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais, ni autre permission, à moins d'avis contraire.

- On demande seulement :
  - de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
  - d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
  - d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCan) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCan ni avec l'appui de celui-ci.

- La reproduction et la distribution à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de RNCan.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCan à nrcan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca.

Des exemplaires supplémentaires sont disponibles à l'adresse suivante :

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides
1055, rue du P.E.P.S.
C.P. 10380, Succ. Sainte-Foy
Québec (Québec) G1V 4C7

Téléphone : 418-648-5789
Télécopieur : 418-648-2529
Site web : *rncan.gc.ca/forets*

Cette publication est disponible sans frais en format PDF sur le site des Publications du Service canadien des forêts : *scf.rncan.gc.ca/publications*

La génomique, qu'est-ce que c'est ?

Au sein de chaque organisme vivant, on retrouve l'ADN. L'ADN est constitué d'un assemblage de quatre sortes de bases azotées (représentées par les lettres A, T, G et C). L'assemblage en série de ces quatre lettres permet de « construire des mots et des phrases » (gènes) pour « rédiger un livre » (génome), regroupant ainsi des milliards de lettres. Le génome, mot constitué des mots *gène* et *chromosome*, rassemble donc l'ensemble de l'information génétique contenue dans chaque cellule d'un organisme vivant. Il peut ainsi être comparé à un manuel d'instructions permettant aux cellules d'accomplir leurs différentes fonctions.

La génomique constitue l'étude du matériel génétique d'organismes vivants, et ce, autant du point de vue de sa structure que de ses fonctions. Depuis une vingtaine d'années, avec l'avancement des techniques de séquençage qui permettent de décoder l'ADN, cette science a connu un essor remarquable. Ses applications permettent de faire avancer les connaissances dans différents secteurs tels que la santé humaine, l'agroalimentaire, les pêches et l'aquaculture, les mines, l'énergie, l'environnement et... la foresterie !

QU'EST-CE QUI EST LE PLUS COMPLEXE : L'ÉPINETTE BLANCHE OU L'ÊTRE HUMAIN ?

Étonnamment, l'épinette blanche a un génome plus complexe que l'être humain. Environ 20 000 mégabases* pour le premier, contre 3 000 mégabases pour le second.

Autres exemples de génomes séquencés :

- Peuplier - 520 mégabases
- Tordeuse des bourgeons de l'épinette - 450 mégabases
- Rouille vésiculeuse - 100 mégabases

**1 mégabase = 100 millions de bases azotées*

LE SÉQUENÇAGE ET LA BIO-INFORMATIQUE POUR DÉCODER L'ADN

Afin de déchiffrer la structure (l'ordre et l'organisation) des quatre lettres (A, T, C et G) dans le génome d'un organisme spécifique, il faut le séquencer ou le « lire ». Étant donné la taille des génomes, cela génère beaucoup de données.

Pour analyser cette importante quantité de données, il faut ensuite avoir recours à de puissants ordinateurs et à des outils bio-informatiques. Ainsi, les génomes peuvent être déchiffrés et scrutés à la loupe. Il est même possible de comparer des portions de génome ou des génomes entiers entre eux pour identifier les différences existant entre des individus et entre des espèces.

La bio-informatique met donc l'informatique au service des sciences biologiques afin de récolter et analyser les données issues de la génomique.

La génomique en foresterie

La génomique permet le développement d'outils pour sélectionner des arbres plus performants et plus adaptés à leur environnement, qui répondent mieux aux besoins du secteur forestier ou qui permettent de reboiser des sites perturbés, par exemple. La génomique vise également à identifier, détecter et lutter contre les ravageurs forestiers, ou à valider la provenance du bois.

Des équipes de recherche du Centre de foresterie des Laurentides (CFL) et du Centre canadien sur la fibre de bois (CCFB), deux centres de recherche du Service canadien des forêts (SCF) de Ressources naturelles Canada, sont à l'avant-garde de la recherche et du transfert technologique dans ces différents domaines. Voici un aperçu des travaux qui s'y déroulent.

LE BOIS MIS EN VALEUR

En étroite collaboration avec FPInnovations, le CCFB développe un savoir et des technologies innovateurs pour accroître les débouchés économiques du bois canadien sous toutes ses formes. Des spécialistes du CCFB à travers le Canada travaillent en amélioration des arbres, en gestion de la végétation, en approche sylvicole novatrice et en caractérisation du bois, tout en développant un savoir-faire en transfert et développement technologiques.

Pour en savoir plus : *ccfb.rncan.gc.ca*

La sélection génomique pour le reboisement

Les différentes espèces d'épinettes totalisent plus de la moitié des volumes de bois récoltés et utilisés par l'industrie forestière canadienne (pâtes et papiers, bois d'œuvre). L'épinette blanche est prisée pour le reboisement à cause de ses propriétés intéressantes, dont une bonne croissance, une bonne qualité du bois et une faible susceptibilité aux ravageurs. Le génome de cette espèce est maintenant entièrement déchiffré. Le programme d'amélioration de l'épinette blanche est l'un des plus avancés au Canada. Ce programme utilise des portions de génome (marqueurs) associées à certaines caractéristiques de l'arbre pour sélectionner des épinettes blanches ayant un meilleur rendement (croissance et qualité du bois) ou une plus grande capacité d'adaptation à diverses conditions environnementales (sécheresse, maladies).

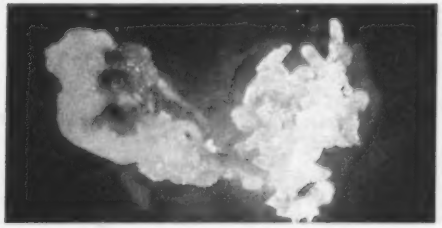
Les équipes de recherche du SCF combinent des approches classiques de sélection des arbres, telles que la physiologie et la dendroécologie (étude des relations des arbres avec leur habitat, à travers le temps), à des approches génomiques pour identifier les marqueurs génétiques impliqués dans les caractéristiques des arbres. Comme la sélection fondée sur les marqueurs peut être réalisée à n'importe quel stade de développement de l'arbre, les individus prometteurs peuvent être identifiés dès les premières années de croissance. Cela évite d'avoir à attendre 20 ou 30 ans pour évaluer le potentiel d'un arbre, comme le requièrent les programmes traditionnels d'amélioration génétique. De plus, l'identification des arbres peut se faire en utilisant leur empreinte génétique (code-barres) plutôt que leurs traits physiques.

En bref, cette approche permet de sélectionner et, par la suite, de reproduire par croisement ou embryogénèse, des plants possédant des caractéristiques recherchées, par exemple :

- une meilleure adaptation aux conditions environnementales changeantes;
- des attributs de qualité (port droit, moins de branches, tronc cylindrique, densité élevée, etc.) pour les besoins présents et futurs du secteur forestier;
- une plus grande résistance aux insectes et maladies.

« COPIER-COLLER » UN ARBRE

Et si à partir d'une seule graine d'un arbre jugé exceptionnel pour son bois, son apparence et sa résistance on pouvait obtenir rapidement une série d'individus identiques tout aussi supérieurs ? C'est possible en combinant la sélection génomique à l'embryogenèse somatique, une méthode de clonage végétal. Celle-ci permet de produire en laboratoire, à partir d'une seule graine, une multitude d'embryons qui deviendront des arbres génétiquement identiques. La sélection génomique accélère le processus : les chercheurs peuvent identifier les embryons à cloner sans devoir attendre plusieurs années de croissance. Le SCF est un chef de file mondial quant à l'application du protocole de l'embryogenèse somatique à plusieurs essences.



LE PROJET FASTTRAC : EN MODE SOLUTIONS ACCÉLÉRÉES !

Bon an mal an, il se plante plus de 400 millions de semis d'épinettes au Canada. Les programmes d'amélioration génétique fournissent des semis plus performants pour le reboisement, notamment au plan de la croissance. Des caractères complexes tels que la qualité du bois et la résistance aux ravageurs sont également recherchés.

Des équipes de recherche du SCF, en collaboration avec différents partenaires (Université Laval, FPInnovations, Génome Québec, Génome Atlantique, Génome Canada, New Brunswick Tree Improvement Council, JD Irving et le ministere des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec), élaborent des tests rapides pour sélectionner des épinettes présentant les attributs du bois recherchés en se servant de la génomique. Ces outils diagnostiques permettent de prédire la valeur génétique d'un arbre dès le stade du semis plutôt qu'après une phase d'évaluation en champs qui peut durer jusqu'à 30 ans pour certains caractères. Ainsi, des modèles de sélection génomique permettront de caractériser des milliers d'épinettes blanches et d'épinettes de Norvège selon leur croissance potentielle, la densité de leur bois ou leur résistance aux insectes et maladies. Grâce à la génomique, les arbres avec les attributs souhaités peuvent être plantés beaucoup plus vite et leur valeur pourrait augmenter jusqu'à 20 % au fil du temps, ce qui représente une valeur ajoutée potentielle de près de 300 millions de dollars par année pour le secteur forestier canadien.

Pour en savoir plus :
fasttracproject.ca/fr

PROJET FastTRAC PROJECT
Tests rapides pour l'amélioration des conifères | Fast Tests for Rating and Amelioration of Conifers

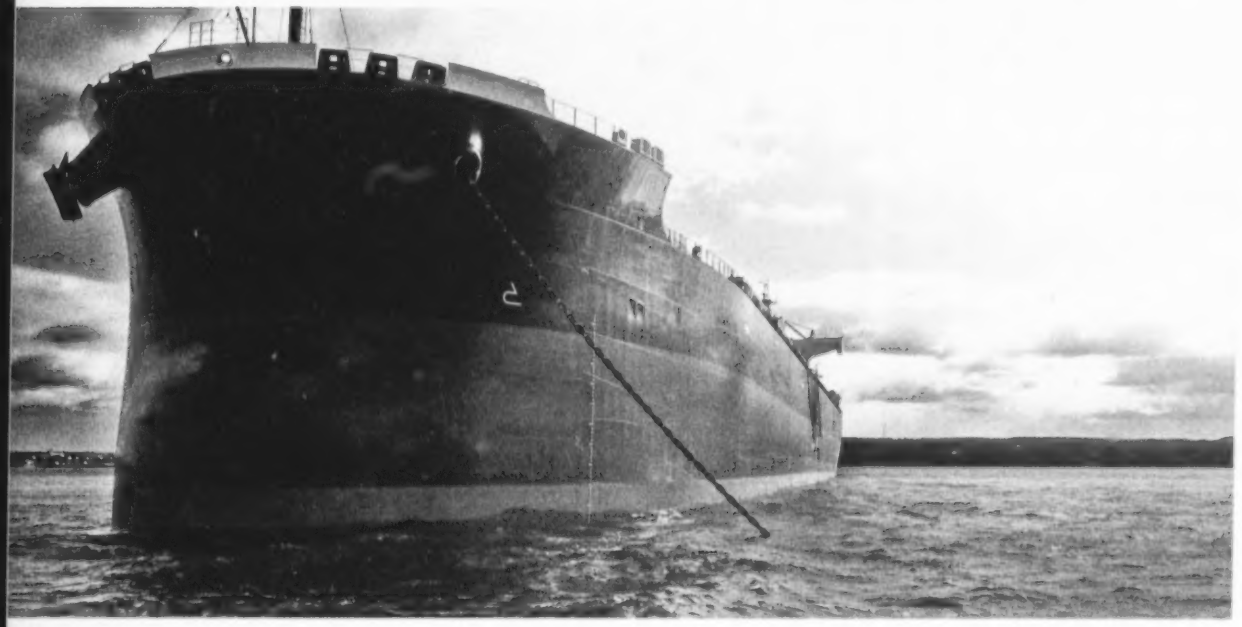
Génome Québec : dossier spécial sur le projet FastTRAC
genomequebec.com/282-nouvelle-genomique-forestiere-dossier-special-sur-le-projet-fasttrac-dans-lapresse-.html

L'identification, la détection et la lutte contre les ravageurs

Les insectes et les maladies affectent des milliers d'hectares de forêt annuellement, entraînant des pertes économiques et environnementales importantes. Au Canada, les pertes de revenus qu'ils entraînent et le coût des mesures de prévention, de lutte et d'atténuation des risques mises en place au fil des ans sont évalués à plusieurs centaines de millions de dollars. De plus, avec l'augmentation des échanges commerciaux mondiaux, les risques d'introduction d'espèces exotiques dommageables pèsent sur les forêts canadiennes.

Heureusement, la génomique permet le développement d'outils additionnels afin d'identifier, détecter et lutter contre les ravageurs forestiers. En effet, elle permet d'identifier rapidement certaines espèces, de mieux comprendre et contrecarrer les stratégies des ravageurs ou encore d'améliorer nos connaissances des mécanismes de défense moléculaire des arbres.

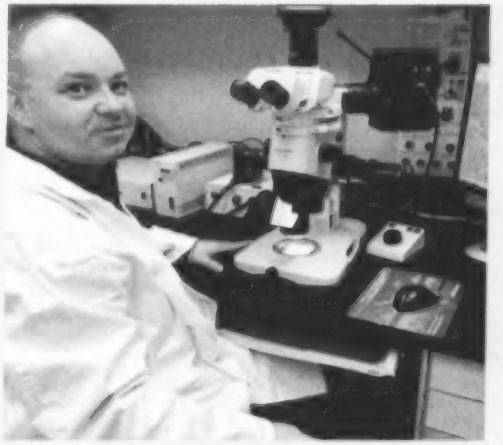
Une des difficultés rencontrées par les chercheurs dans la lutte contre ces ravageurs est l'identification des espèces et la différentiation par rapport à des espèces apparentées. Chez les insectes, à certains stades de développement (œuf, larve), l'identification est parfois difficile, voire impossible. Quant aux agents pathogènes causant des maladies, plusieurs ont peu de critères morphologiques distinctifs observables (couleur, forme, traits particuliers, etc.) et les maladies qu'ils provoquent ne causent pas toujours de signes et de symptômes apparents à court terme.



UN CODE-BARRES GÉNÉTIQUE

À l'instar des codes-barres affichés sur les produits achetés en magasin, les codes-barres génétiques différencient les espèces les unes des autres. Chaque espèce et chaque variété possèdent en effet des segments d'ADN qui leur sont propres. Les chercheurs du monde entier, dont plusieurs du SCF, travaillent à décoder ces cartes d'identité du vivant. Une fois décodés, les codes-barres sont enregistrés dans un catalogue mondial regroupant les données pour tous les organismes vivants. Tout scientifique peut interroger cette base de données lorsqu'il veut identifier rapidement un organisme.

Si l'espèce à laquelle appartient l'organisme est répertoriée, il accédera à son profil identitaire. C'est ainsi que des équipes de recherche du SCF ont pu déclarer hors de tout doute que le redoutable champignon *Melampsora pinitorqua* Rostr., une espèce de rouille du peuplier impossible à différencier d'espèces apparentées au microscope, n'avait pas fait son entrée au Canada. Le code-barres génétique de ce champignon sert maintenant d'outil pour évaluer les plants importés suspects.



Grâce à la génomique, les chercheurs du SCF arrivent maintenant à identifier rapidement différentes espèces de ravageurs. En identifiant des portions du génome spécifiques à certaines espèces, les scientifiques du SCF développent des outils de détection permettant l'identification précoce de certains ravageurs forestiers. Ces tests rapides, simples et économiques, basés sur l'empreinte génétique de l'espèce ciblée, permettent de différencier les espèces inoffensives de celles pouvant engendrer des dégâts importants. Des chercheurs du SCF ont ainsi développé un des premiers tests permettant de traquer le champignon *Phytophthora ramorum*, l'agent pathogène responsable de l'encre des chênes rouges. Cette maladie dont les symptômes varient d'une espèce à l'autre s'attaque à une centaine d'espèces de plantes en Amérique du Nord et en Europe, dont plusieurs espèces d'arbres. Comme l'agent pathogène responsable de cette maladie n'est pas encore établi au Canada, il est sous haute surveillance par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). Cette dernière utilise d'ailleurs les outils de détection développés par le SCF afin d'intervenir rapidement en cas d'introduction au Canada.

Il est également possible de détecter la présence de ravageurs de manière plus indirecte, par la détection de signaux moléculaires de défense chez les arbres. En effet, l'attaque par un insecte ou un agent pathogène engendre une réaction de défense chez l'arbre, réaction qui est elle-même dictée par le génome de l'arbre. Cette réaction peut être détectée par le biais de la génomique et ainsi offrir un outil additionnel de détection.

Finalement, la génomique permet de mieux lutter contre les ravageurs en permettant de mieux connaître les gènes impliqués dans les fonctions biologiques de base des ravageurs (dont la survie hivernale et la reproduction) ou ceux qui permettent aux ravageurs de s'attaquer aux arbres. Ces connaissances rendent possible le développement de stratégies pour les contrecarrer. Plus encore, en étudiant les mécanismes de défense moléculaire des arbres, il est possible d'identifier les gènes de résistance naturelle à un ravageur. Les équipes de recherche peuvent ensuite sélectionner des arbres plus résistants à l'aide de la sélection génomique.

ASIE OU EUROPE ?

La spongieuse asiatique fait partie des ravageurs exotiques étudiés de façon prioritaire au SCF, et pour cause ! L'insecte, très bien adapté au froid, s'attaque à plus de 500 espèces d'arbre. De plus, les femelles sont capables de voler et de coloniser de grands territoires, contrairement aux femelles de son espèce parente, la spongieuse européenne. L'introduction de la spongieuse asiatique pourrait donc causer d'importants dommages à la fois socioéconomiques et environnementaux. Elle n'est présentement pas établie au Canada; cependant, sa présence sous forme de masses d'œufs a été détectée à quelques reprises sur des navires entrant dans les ports canadiens.

Une simple inspection visuelle des masses d'œufs ou de jeunes larves ne permet pas de différencier la spongieuse asiatique de sa consœur européenne déjà établie en Amérique du Nord. Les équipes de recherche du SCF et leurs partenaires ont constitué une banque de marqueurs d'ADN de la spongieuse asiatique et d'espèces apparentées, afin de mettre au point une série de tests de détection moléculaires spécifiques soit à la spongieuse asiatique, soit à la spongieuse européenne ou encore à l'une des cinq autres espèces de spongieuses exotiques représentant une menace pour les forêts canadiennes. L'ACIA utilise cet ensemble d'outils issus de la génomique pour traquer l'insecte envahisseur dans les ports canadiens. Ainsi, des mesures de quarantaine pourront être prises par les autorités compétentes au besoin.

GROUILLE, ÇA ROUILLE !

La rouille vésiculeuse du pin blanc, causée par le champignon *Cronartium ribicola*, est une autre maladie sournoise. Elle a été introduite en Amérique du Nord au début du 20e siècle sur des semis de pin blanc importés d'Europe. Aujourd'hui, elle affecte 90 % des plantations de pins blancs du Québec et peut entraîner une mortalité importante. Chaque année, des millions de plants de pin blanc sont utilisés pour le reboisement. Des mesures sont prises en pépinière afin de prévenir les infections par la rouille. Toutefois, malgré ces précautions, il peut arriver que des semis infectés soient plantés, car la maladie est asymptomatique pendant les premières années suivant l'infection. Pour résoudre ce problème, des équipes de recherche du SCF ont développé un test basé sur l'empreinte génétique de l'agent pathogène afin de déceler sa présence dans les tissus de l'arbre ou des semis. Ce test est utilisé depuis 2011 et il appuie la certification phytosanitaire des plants de pin blanc produits dans six pépinières forestières au Québec.

INFESTATION EN ROND ?

La maladie du rond, établie au Québec depuis 1989, affecte entre autres les pins en plantation lors des opérations d'éclaircie. Les souches fraîchement coupées sont des portes d'entrée de choix pour les spores du champignon *Heterobasidion irregulare*. Celles-ci infectent ensuite les arbres sains par contacts racinaires, entraînant des pertes économiques considérables. Le champignon peut survivre très longtemps dans les souches et les racines : au-delà d'un demi-siècle. Les équipes de recherche du SCF ont développé des outils moléculaires pour détecter et évaluer la présence de ses spores dans l'air et ainsi estimer le risque d'infection pour un territoire donné. Cela permet de réagir rapidement en cas d'infection, avant que la maladie ne soit impossible à éradiquer.

LE PROJET TAIGA : PROTÉGER LA FORÊT

Pour prévenir l'introduction et la propagation de maladies, des chercheurs du SCF ainsi que de plusieurs institutions partenaires (University of British Columbia, University Simon-Fraser, Michael Smith Genome Sciences Centre, ACIA, FPInnovations, Boreal Genomics, Génome Colombie-Britannique et Génome Canada) ont mis leurs efforts en commun pour développer des outils plus efficaces de détection et de surveillance des agents pathogènes exotiques basés sur leur empreinte génétique. Plus d'une cinquantaine de tests de détection moléculaire, ciblant des espèces exotiques non établies au Canada, ont été développés par les équipes de recherche du SCF. Ces outils ont ensuite été transférés à l'ACIA pour lui permettre de réagir rapidement en cas d'introduction de maladies. Grâce à la génomique, les agents pathogènes sont suivis de près !

taigaforesthealth.com

TAIGA
FOREST HEALTH

DÉMASQUER L'INTRUS

Depuis son apparition au Canada en 2002, l'agrile du frêne a déjà tué plusieurs millions de frênes. Les scientifiques du SCF estiment que les coûts de traitement, d'abattage et de remplacement des arbres affectés par cet insecte exotique atteindraient les 2 milliards de dollars sur 30 ans au Canada. Le défi ? Détecter l'insecte de manière précoce. Les arbres nouvellement attaqués par l'agrile ne présentent pas de symptômes et il n'existe pour le moment aucune méthode pour détecter rapidement l'infestation. Le frêne indigène ne semble pas encore avoir développé de résistance naturelle à ce ravageur; cependant, les chercheurs savent que toute attaque chez un arbre induit une réaction de défense. Des chercheurs du SCF tentent d'identifier et de caractériser cette réponse moléculaire chez les frênes attaqués par l'agrile afin de l'utiliser pour détecter la présence du ravageur, et ce, avant que l'arbre ne montre de symptômes. Ces connaissances pourraient aussi être utilisées dans les programmes d'amélioration génétique du frêne et dans le développement de nouveaux outils de lutte contre l'agrile.

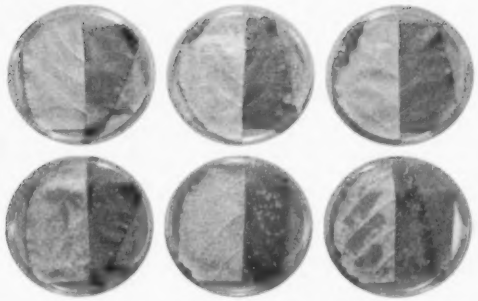
RÉDUIRE LES DOMMAGES

—

Les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette (TBE) représentent la plus importante perturbation naturelle affectant les sapinières canadiennes. Dans l'est du pays, la TBE détruit autant d'arbres que les feux de forêt. Depuis 2006, une nouvelle épidémie sévit d'ailleurs au Québec et au Nouveau-Brunswick. En 2017, la tordeuse a défolié plus de 3,4 millions d'hectares de forêt sur le territoire de la Côte-Nord au Québec, ce qui représente un territoire aussi grand que la Belgique !

Pour parfaire les stratégies actuelles de lutte contre les dommages causés par la TBE, des équipes de recherche du SCF travaillent à analyser le génome de cet insecte. Elles s'intéressent plus particulièrement aux gènes spécifiques de la tordeuse qui pourraient servir au développement d'outils de lutte. Par exemple, les gènes associés à la survie hivernale de l'insecte pourraient être bloqués pour augmenter le taux de mortalité pendant la saison froide.

RÉPONSE DES FEUILLES DE PEUPLIER À UNE INFECTION PAR LA ROUILLE



PEUPLIERS ROUILLÉS

La rouille foliaire du peuplier est l'une des maladies forestières les plus dommageables à travers le monde, œuvre de différentes espèces du champignon *Melampsora*. Des chercheurs du SCF ont remarqué que les peupliers possèdent dans leur bagage génétique un certain niveau de résistance naturelle à la rouille. Par contre, ce bouclier est souvent spécifique à une espèce pathogène et, avec le temps, il peut être déjoué par le champignon. Les scientifiques du SCF ont donc cherché dans le génome des peupliers des gènes de résistance qui ne seraient pas spécifiques à une seule espèce de rouille. Grâce à la génomique, ils ont identifié 26 gènes associés à la résistance contre plusieurs espèces de rouille. Cette découverte pourrait permettre de produire des peupliers ayant une résistance accrue et durable face à ces champignons pathogènes.

Plus encore, en étudiant la réponse des feuilles de peuplier à une infection par la rouille, les chercheurs du SCF ont remarqué que l'arbre sécrète une protéine aux propriétés antifongiques. Celle-ci arrête la germination des spores de champignon sur les feuilles. En étudiant davantage cette protéine, les scientifiques espèrent mieux comprendre les mécanismes de défense de l'arbre et, ultimement, les exploiter pour lutter contre cette maladie. D'ici là, les chercheurs misent sur les outils de détection moléculaire pour identifier spécifiquement les espèces de champignons que l'on retrouve sur les peupliers et qui infectent aussi d'autres espèces, comme les mélèzes, les pins ou différentes plantes herbacées.

ARMER LES NOYERS

Le chancre du noyer cendré menace la survie de cet arbre. La maladie a été signalée pour la première fois au Québec en 1990. La faible variabilité génétique et la très grande virulence du champignon qui cause ce chancre (*Ophiognomonia clavigignenti-juglandacearum* – OCJ) indiquent qu'il s'agit fort probablement d'un ravageur exotique. Le vent, la pluie et possiblement divers insectes transportent le champignon d'un arbre à l'autre. L'infection qu'il provoque se manifeste d'abord par la formation de chancres dans la cime, puis dans les parties inférieures de l'arbre. Avec le temps, la maladie tue les branches affectées et lorsque son tronc est annelé, l'arbre meurt.

Pour soutenir la gestion de cette maladie, la génomique a permis de développer des tests moléculaires permettant d'évaluer la sporulation du champignon chez les arbres étudiés. Ces tests quantitatifs, sensibles au point de détecter une seule spore d'OCJ, ont ainsi permis d'évaluer l'efficacité de différents traitements sylvicoles destinés à promouvoir la vigueur des arbres et d'identifier ceux qui sont les plus efficaces.

De plus, les chercheurs ont constaté que des noyers cendrés semblaient posséder un certain niveau de résistance à la maladie. Avant d'explorer davantage cette résistance, les équipes de recherche ont voulu s'assurer de l'identité de ces arbres. En effet, puisque le noyer japonais, une espèce exotique, est une espèce qui montre également une certaine résistance à l'OCJ, et qu'il est connu pour s'hybrider avec le noyer cendré, les chercheurs voulaient être en mesure de détecter la présence d'hybridation entre les deux espèces. Pour ce faire, des outils moléculaires ont été développés pour permettre une détection rapide d'hybrides. Ces outils permettent de vérifier que les noyers résistants sont bel et bien des noyers cendrés purs (espèce indigène) et non des hybrides composés d'un mélange de noyer cendré et de noyer japonais. Cette caractérisation fiable des hybrides facilitera ainsi les études futures sur la résistance à l'OCJ chez le noyer cendré et pourrait éventuellement permettre le rétablissement de l'espèce qui est protégée depuis 2005 en vertu de la *Loi sur les espèces en péril*.

L'impact des changements climatiques

Comme l'ensemble de la planète, les forêts canadiennes doivent faire face aux changements climatiques. Le Canada étant un pays nordique, les scientifiques s'attendent à ce que les bouleversements du climat y soient plus marqués que la moyenne mondiale.

Dans ces circonstances, la génomique peut être un outil intéressant pour mieux mesurer l'impact des changements climatiques sur la productivité des forêts et contribuer aux solutions d'adaptation. Les modèles actuels considèrent que tous les arbres ont la même réponse aux aléas du climat, ce qui est loin d'être la réalité. En intégrant la variabilité génomique des arbres à ces modèles, les scientifiques pourront, entre autres, caractériser les populations d'arbres selon leur réponse à un type de changement, par exemple au gel, à la sécheresse ou à la hausse de concentration du gaz carbonique. Il sera ainsi plus facile de sélectionner les semis pour le reboisement ou de protéger certaines espèces selon les conditions climatiques attendues dans 10, 20 ou 30 ans.

Soutien à la certification forestière

Chez les peupliers, différentes espèces ont la capacité de s'hybrider facilement entre elles. L'hybridation est le résultat d'un croisement entre deux espèces différentes (exotiques ou indigènes); elle engendre des hybrides qui possèdent des attributs des deux parents. En effet, des travaux effectués par des équipes de recherche du SCF ont démontré que les peupliers exotiques (originaires d'un autre pays), dont certains ont été introduits il y a plus de 300 ans, pouvaient s'hybrider avec des peupliers indigènes.

En raison de leur fort potentiel de croissance, les peupliers hybrides à composante exotique sont de plus en plus utilisés dans les plantations à travers le monde, notamment pour la production de biomasse. Ils sont aussi prisés comme brise-vent sur les terres agricoles. C'est ainsi que dans les Prairies canadiennes, des peupliers russes (exotiques), dont

certains sont déjà des hybrides, ont été croisés avec des peupliers deltoïdes (indigènes). Ces nouvelles variétés hybrides sont reconnues pour leur capacité d'adaptation aux conditions climatiques continentales extrêmes.

Cependant, certaines normes de certification forestière et la réglementation de certaines provinces limitent la plantation de peupliers hybrides ou à caractère exotique. L'objectif est de limiter la dispersion de ces caractères au sein de la régénération naturelle. Dans cette situation, le défi est de bien identifier ces caractères afin de pouvoir mesurer et surtout contrôler leur dispersion. En effet, l'échange de matériel génétique qui se produit lorsque différentes espèces s'hybrident rend cette identification très difficile, particulièrement lorsque les espèces cohabitent sur le même territoire. Les experts du SCF ont toutefois développé un outil diagnostique basé sur des marqueurs génétiques qui permet de distinguer les dix espèces (indigènes et exotiques) de peupliers les plus couramment retrouvés en Amérique du Nord ainsi que leurs hybrides. Les suivis de dispersion sont ainsi grandement facilités.

Restauration de sites perturbés

Les activités humaines, combinées aux changements climatiques, peuvent affecter la qualité et la productivité des sols. Une des solutions envisagées par les scientifiques pour rétablir les terres perturbées par l'exploitation de ressources naturelles, par exemple, passe par les micro-organismes (microbiome) présents dans le sol. Ceux-ci jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'azote et du carbone, aident les plantes à mieux assimiler certains nutriments et participent à la dégradation de composés complexes, dont certains polluants, comme les hydrocarbures. Cette dernière fonction est ce qu'on appelle la phytoremédiation.

En utilisant la génomique, les équipes de recherche du SCF comparent le microbiome de sols non perturbés à celui provenant d'environnements perturbés par diverses activités humaines. En étudiant l'identité des espèces présentes et leurs rôles en fonction des caractéristiques des sols, il est possible d'identifier des indicateurs biologiques de stress environnementaux. Ces indicateurs servent ensuite à mieux prévoir l'impact de différentes perturbations et à effectuer un suivi lors de la réhabilitation des sites perturbés. Ces études permettent aussi d'identifier les meilleures combinaisons plantes/micro-organismes pour restaurer les sites perturbés.

La génomique et l'économie

Les chercheurs du SCF misent sur le transfert de connaissances à différents partenaires (p. ex. : pépinières forestières, ministères provinciaux, agences de réglementation) pour diminuer les pertes économiques attribuables aux insectes, aux maladies et au climat ainsi que pour augmenter la valeur de la forêt. Les marqueurs moléculaires et les code-barres génétiques obtenus à partir de l'étude du génome font partie des outils utilisés pour :

- appuyer les efforts d'aménagement forestier au Canada;
- diversifier les produits pour les marchés internationaux;
- produire et récolter de la matière ligneuse de qualité;
- accélérer l'identification des attributs du bois recherchés;
- prévenir l'introduction et contrer l'impact des ravageurs forestiers;
- atténuer l'impact des changements climatiques et s'y adapter;
- renforcer le leadership environnemental du Canada.

L'avenir de la recherche en génomique

Les collaborations sont au cœur des stratégies et des succès en génomique forestière au Canada. À cet effet, les projets d'envergure de la page suivante impliquent des équipes de recherche du SCF.

DESCRIPTION	INSTITUTIONS PRINCIPALES	PARTENAIRES
SPRUCE-UP : AMÉLIORER DAVANTAGE LES ÉPINETTES L'amélioration génétique des épinettes blanches destinées au reboisement vise à développer des arbres mieux adaptés aux changements climatiques. Les traits recherchés sont la résistance aux insectes et à la sécheresse, l'efficacité d'utilisation des nutriments, la qualité du bois et une bonne croissance.	• University of British Columbia • Université Laval	SCF, Commission géologique du Canada, BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, University of Oxford, Max Planck Institute for Chemical Ecology, Precision Hawk, University of Alberta, FPInnovations, Joint Genome Institute (US Department of Energy), University of Toronto, Alberta Innovates, Alberta Agriculture and Forestry, Genome BC, Genome Prairies, Genome Québec, Genome Canada.
BIOSAFE: ESPÈCES EXOTIQUES ENVAHISSANTES SOUS SURVEILLANCE Les espèces exotiques envahissantes, telles que le longicorne asiatique, la maladie hollandaise de l'orme, l'encre des chênes rouges et la spongieuse asiatique, menacent les forêts du Canada. Une nouvelle suite d'outils permettra de les détecter plus efficacement et d'identifier leur origine géographique ainsi que leur route d'introduction. Ce travail augmentera la vitesse d'intervention et atténuera ces menaces à la source.	• University of British Columbia • Université Laval • ACIA	SCF, FPInnovations, Université McGill, University of Victoria, University of Western Ontario, BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Manitoba Conservation and Water Stewardship, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Forest Service Branch - Saskatchewan Government, Alberta Agriculture and Forestry, Genome BC, Genome Québec, Genome Canada.
COADAPTREE: DES ARBRES EN SANTÉ QUI S'ADAPTENT AUX FUTURES CONDITIONS CLIMATIQUES Des chercheurs planchent sur de meilleures options de reboisement pour les essences à fort rendement économique, telles que le sapin de Douglas, le pin tordu, le mélèze occidental et le pin gris. Le projet s'appuie sur des outils génomiques combinés à des expériences pour tester la résistance des arbres à la chaleur, au froid et aux stress dus à la sécheresse et aux maladies.	• University of British Columbia • University of Calgary • Université Laval	SCF, University of Toronto, University of Victoria, University of Alberta, BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources, Alberta Environment & Sustainable Resource Development, Alberta Tree Improvement & Seed Centre, Western Forest Products, Timberwest, BC Forest Genetics Council, SelectSeed Ltd., USDA Forest Service, Swiss Federal Research Institute, Vernon Seed Orchard Company, Compute Canada, Genome BC, Genome Québec, Genome Alberta, Genome Canada.
FORÊTSRÉSISTANTES(RES-FOR):FAIREFACEAUXMENACES Ce projet exploite le profilage métabolique et la modélisation mathématique dans les programmes actuels de sélection génétique pour produire des arbres résistants aux épidémies d'insectes et aux sécheresses qui offrent également une meilleure qualité du bois.	• University of Alberta • University of British Columbia	SCF, University of Calgary, Alberta Innovates, Blue Ridge Lumber Inc., Hinto Wood Products, Alberta Agriculture and Forestry, Weyerhaeuser, Forest Resource Improvement Association of Alberta, Genome Alberta, Genome BC, Genome Canada.
ECOBIOMICS: ÉTUDES DE SITES PERTURBÉS Ce projet utilise la génomique pour évaluer la biodiversité du sol et de l'eau dans différents écosystèmes. Cela servira ensuite à mesurer l'impact du développement des ressources naturelles sur la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes. Le microbiome de l'eau et du sol et les invertébrés aquatiques seront ainsi étudiés dans divers sites de la région des Grands Lacs (Ontario), de la forêt boréale en Ontario et du Québec et dans la région des sables bitumineux, y compris le delta Peace-Athabasca (Alberta).	• ACIA • Conseil national de recherche du Canada • Environnement et Changement climatique Canada • Pêches et Océans Canada • Agence de la santé publique du Canada • Agriculture et Agroalimentaire Canada	SCF, plusieurs municipalités (Clarenceville, St-Armand, Venise-en-Québec, Pike River), Direction de la santé publique du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Université de Montréal, Université du Québec à Montréal, University of British Columbia, Alberta Environmental Monitoring, Evaluation and Reporting Agency, University of Waterloo, Oregon State University, National Ecological Observatory Network (NEON), Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, Ontario Soil and Crop Improvement Association, Ministère de l'Agriculture et des Pêches de l'Île-du-Prince-Édouard, University of Prince Edward Island, Tembec, Produits forestiers Résolu, Sustainable Forestry Initiative, Laurentian University, JD Irving Ltd., University of New Brunswick, University of Toronto.

Pour en savoir davantage

VIDÉOS

Comment la génomique peut-elle aider le secteur forestier canadien ?
Vidéo de Ressources naturelles Canada
rncan.gc.ca/forets/videos/17159

Génomique forestière
Vidéo de FPInnovations
youtube.com/watch?v=WxHclVS79QI

Genomics and the forestry sector
Vidéo de Génome Canada/Génome BC (en anglais)
youtube.com/watch?v=aVmRgejbEng

Les gènes de nos forêts
Vidéo de Marine Vautier, étudiante au doctorat (Université Laval)
youtube.com/watch?v=jui61dN-s3A

PUBLICATIONS

Les défis du secteur forestier et les solutions génomiques
genomecanada.ca/sites/genomecanada/files/pdf/fr/Forestry_FR.pdf

Génomique forestière et sélection assistée par marqueurs
scf.rncan.gc.ca/projets/90

L'épinette blanche à l'ère de la sélection génomique
partenariat.qc.ca/wp-content/uploads/2015/07/OT-185.pdf

Chaire de recherche du Canada en génomique forestière
genomiqueforestiere.chaire.ulaval.ca

La génomique forestière : pour trouver une réponse aux maladies
cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/37331.pdf

L'État des forêts du Canada, Rapport annuel 2017
rncan.gc.ca/forets/rapport/16497